

УДК 621.396.67

Метод резонансов для измерения дисперсионной характеристики цепочки связанных резонаторов

К. В. Троцюк, В. Б. Профе, А. И. Астайкин, А. П. Мартынов
Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Обоснована применимость метода резонансов к замедляющей структуре (ЗС) типа “цепочка связанных резонаторов” (ЦСР), используемой в усилителях и генераторах сантиметрового диапазона длин волн. Рассмотрены экспериментальные результаты, полученные на макете замедляющей структуры типа ЦСР.

В настоящей работе метод резонансов обоснован применительно к замедляющей структуре, показанной на рис. 1. Однако он без труда может быть распространен на ЗС любого типа.

Метод резонансов основан на выделении из замедляющей структуры отрезка, закорачиваемого на концах. Если между местами короткого замыкания имеется N ячеек, то резонанс наступит при условии

$$N\varphi = k\pi, \quad (1)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$

Если измерить все резонансные частоты, то при известном числе ячеек можно определить все фазовые углы и построить фазовую характеристику. Резонансные частоты легко находятся методом прохождения или поглощения. Наиболее приемлем метод прохождения. При его использовании изменяют частоту генератора до тех пор, пока на выходе отрезка ЗС не будет достигнут максимум проходящего сигнала (минимум затухания), которому и будет соответствовать данная фиксированная частота. Если используется генератор качающейся частоты, то при развертке сигнала, прошедшего через ЗС, наблюдается интерференционная картина с явно выраженными максимумами. Это и есть резонансы, на частоте которых сдвиг фазы на периоде ЗС равен π . Однако при этом следует помнить, что кроме основных, могут присутствовать и побочные резонансы, хотя вероятность их появления мала. Данный метод пригоден для снятия дисперсионных характеристик замедляющих систем типа цепочек резонаторов и других типов ЗС, в том числе и систем с круговой симметрией, применяемых в ЛОВ типа М, магнетронных усилителях, платинотронах.

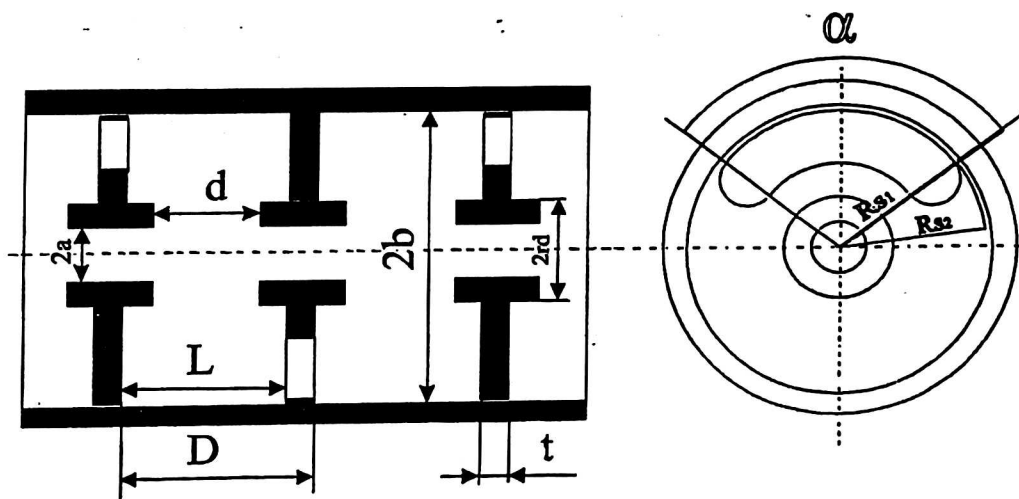


Рис. 1. Замедляющая структура типа "цепочка связанных резонаторов".

D — период структуры; L — длина тороидального резонатора; d — расстояние между трубками дрейфа; b — радиус резонатора; a — радиус пролетного канала; R_{s1} — внутренний радиус щели; R_{s2} — внешний радиус щели; rd — радиус трубки дрейфа; t — толщина стенки резонатора; α — угол раскрытия щели.

Обоснование применимости метода резонансов

Пусть имеется линия передачи энергии 2 (рис. 2), последовательно соединенная с линиями передач 1 и 3. Можно предположить, что в местах соединения линии 2 с внешними устройствами, вследствие неидеальности взаимного согласования, будут возникать отраженные волны. Поэтому в системе будет присутствовать стоячая волна, уровень которой зависит от коэффициентов отражения от границ структуры.

В результате на границе линии передач можно ожидать интерференционную картину, возникающую при сложении падающих и отраженных волн. Пусть линия передач 2, в нашем случае ЗС, соединена с линией 1, которая нагружена на согласованный генератор, и линией 3, соединенной с согласованной нагрузкой (измерительным блоком). Рассмотрим в этом случае процесс прохождения волны от генератора до нагрузки в соответствии со схемой, показанной на рис. 2.

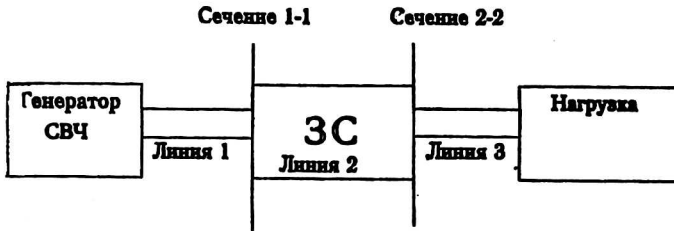


Рис. 2. Схема соединения линий передач

Волна от генератора, пройдя по линии 1, отразится от ЗС в сечении 1—1, коэффициент отражения со стороны генератора равен $\Gamma_{1г} = \Gamma_1$

$$\Gamma_{1г} = \Gamma_1 = \frac{Z_{ЗС} - Z_1}{Z_{ЗС} + Z_1}, \tag{2}$$

где $Z_{ЗС}$ — волновое сопротивление ЗС;
 Z_1 — волновое сопротивление линии 1.

Волна пройдет в ЗС с амплитудой $U_{n1} = U_1(1 - \Gamma_1)$, после чего подойдет к сечению 2—2 с амплитудой $U_{n1} = U_1(1 - \Gamma_1)e^{-i\beta L}$, где β — продольная постоянная распространения волны в ЗС; L — длина ЗС; βL — набег фазы на длине ЗС.

Далее волна отразится от сечения 2—2, при этом коэффициент отражения $\Gamma_2 = \Gamma_{2г}$

$$\Gamma_{2г} = \Gamma_2 = \frac{Z_{ЗС} - Z_3}{Z_{ЗС} + Z_3}, \tag{3}$$

Z_3 — волновое сопротивление линии 3.

Линии 1 и 3 можно убрать из схемы, тогда $Z_3 = Z_{нагр}$ и $-Z_{1г} = Z_{ген}$. При этом на выходе ЗС появится сигнал

$$U_{n1} = U_1(1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2)e^{-i\beta L}, \tag{4}$$

и амплитуда отраженной волны, которая подошла к сечению (1—1) и отразилась от него, будет $U_{o1} = U_1(1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2)\Gamma_1 e^{-i2\beta L}$.

Отраженная волна, прошедшая через сечение 1—1 в направлении к генератору, не представляет интереса. Большой информативностью для определения ДХ обладают волны, прошедшие ЗС.

Проанализируем процесс дальше. В следующий раз волна, пройдя через ЗС, около сечения 2—2 будет иметь амплитуду

$$U_{n2} = U_1(1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2)^2 \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-i3\beta L}. \tag{5}$$

Если проследить процесс прохождения волны по замедляющей структуре дальше, то можно установить, что амплитуда волны, вышедшей из ЗС в третий раз, будет следующей:

$$U_{n3} = U_1(1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2)^3 \Gamma_1^2 \Gamma_2^2 e^{-i5\beta L}. \quad (6)$$

Все сигналы, прошедшие через ЗС, интерферируют, и полученный сигнал можно записать в виде ряда

$$U_n = \sum_{n=0}^{\infty} U_1 (1-\Gamma_1)(1-\Gamma_2)^{n+1} \Gamma_1^2 \Gamma_2^2 e^{-i(2n+1)\beta L}. \quad (7)$$

Следствием конечной проводимости металла, из которого изготовлена ЗС, является достаточно большое затухание волн, прошедших ЗС несколько раз. На практике из-за затухания учитывают волны, прошедшие через ЗС не более пяти—семи раз. Поэтому ряд можно ограничить пятью—семью членами. Учитывая, что третий, пятый и седьмой члены ряда обладают 2-м, 4-м и 9-м порядками малости, соответственно, их можно отбросить. Разложив экспоненту по формуле Эйлера, получим амплитуду прошедшей волны в первом приближении

$$U_n = U_1(1-\Gamma_1)(1-\Gamma_2)[\cos(\beta L) + i \sin(\beta L)]. \quad (8)$$

Максимумы амплитуды прошедшей волны будут наблюдаться при следующих условиях:

$$\cos(\beta L) = \pm 1 \quad \text{и} \quad \sin(\beta L) = 0. \quad (9)$$

Итак, при $\sin(\beta L) = 0$ имеем:

$$\beta_0 L = \pi k = \varphi_0 N, \quad (10)$$

где k — целое число. Запишем выражение для постоянной распространения пространственной гармоники

$$\beta_p = \beta_0 + 2\pi p/D, \quad (11)$$

где p — номер пространственной гармоники;

D — длина ячейки резонатора (период структуры).

Следовательно, фазовая скорость пространственной гармоники p будет:

$$V_{\Phi} = \frac{\omega}{\beta_p} = \frac{2\pi f D}{\varphi_0 + 2\pi p}. \quad (12)$$

Известно, что замедление вычисляется следующим образом:

$$n = C/V_{\Phi}. \quad (13)$$

Из выражения (10) следует, что набег фазы колебаний на длине ЗС равен πk , тогда на периоде ЗС фаза колебаний изменится на $\frac{\pi k}{N}$, где N — число резонаторов или число периодов в системе.

Набег фазы нулевой пространственной гармоники на длине ЗС может изменяться от нуля до π . Это накладывает ограничения на параметр k : $k \in \{0, \dots, N-1\}$.

Длина структуры определяется как $L = ND$. Используя вышеперечисленные условия и полагая, что замедление всех пространственных гармоник есть

положительное число, запишем выражение для замедления пространственной гармоники p

$$n = \frac{c(N - 2\pi p)}{2fL}, \quad (14)$$

тогда коэффициент замедления минус первой пространственной гармоники, наиболее часто используемой в приборах с ЦСР $p = -1$, записывается в виде

$$n = \frac{c(N + k)}{2fL}, \quad (15)$$

где k — номер минимума ослабления или максимума амплитуды волны.

Согласно полученному выражению (15), для коэффициента замедления n можно экспериментально определить ДХ линии передач, в нашем случае замедляющей структуры типа ЦСР. Для нахождения замедления n необходимо экспериментально установить частоты минимумов ослабления и порядковый номер минимума. Для цепочки связанных резонаторов номер $k = 0$ присваивается минимуму, находящемуся около коротковолновой границы резонаторной полосы пропускания, и минимуму, находящемуся на длинноволновой границе щелевой полосы пропускания.

Для измерения параметров интерференционной картины, получаемой на выходе ЗС, в качестве нагрузки можно использовать измерительное плечо измерителя комплексных коэффициентов передачи Р4-38 с волновым сопротивлением 50 Ом. Сигнал в плечо подается с тройника, запитываемого от генератора качающейся частоты (ГКЧ). Через плечо опорного канала “он” часть сигнала от тройника проходит в измерительный блок (ИБ) прибора Р4-38, другая часть сигнала проходит через ЗС по измерительному плечу “ин” и только потом направляется в ИБ.

Подробная схема соединений представлена в инструкции по эксплуатации прибора Р4-38 и называется “Структурная схема соединений измерителя при измерении ослаблений”.

В результате эксперимента, как и предполагалось, на экране наблюдается интерференционная картина сигнала на выходе ЗС (рис. 3). Для калибровки прибора ЗС удаляется из тракта “ин”. После калибровки амплитуда сигнала, прошедшего без затухания, принимается равной единице. Получив картинку на экране монитора, запишем частоты минимумов f_n функции затухания, воспроизводимой на экране измерительного блока.

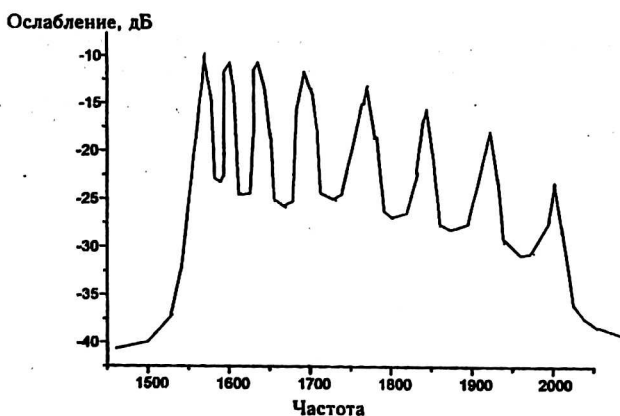


Рис. 3. Интерференционная картина

Подставляя частоту минимума в выражение (15), получим замедление на частоте минимума. Следует отметить, что чем больше периодов в системе, тем больше число экспериментально определенных точек дисперсионной характеристики, тем правильнее мы определим дисперсионную кривую и полосу пропускания.

Характерный вид интерференционной картины на выходе ЗС, воспроизводимой на экране прибора Р4-38 в эксперименте по определению дисперсионной характеристики ЗС типа ЦСР, в которую входят восемь резонаторов, представлен на рис. 4.

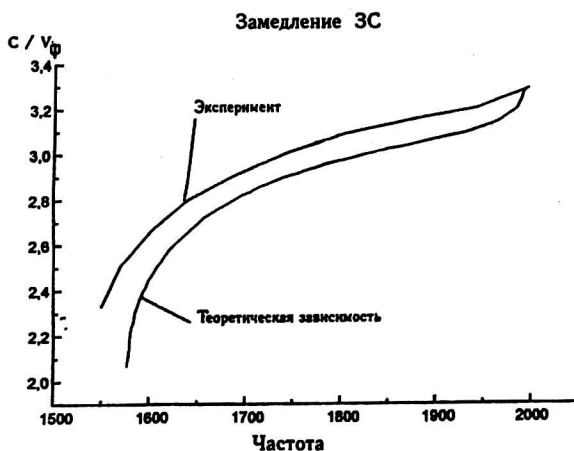


Рис. 4. Зависимость замедления от частоты (частота нормирована)

Размеры резонатора в эксперименте были следующими: $D = 46$ мм, $d = 26$ мм, $b = 52$ мм, $a = 8$ мм, $rd = 11$ мм, $t = 3$ мм, $R_{s1} = 37,5$ мм, $R_{s2} = 51,5$ мм, $\alpha = 90^\circ$.

Method of resonance for measuring a dispersion characteristic of a chain of bound resonators

K. V. Trotsyuk, V. B. Profe, A. I. Astaykin, A. P. Martinov

Russian Federal Nuclear Centre – Russian Scientific – Research Institute of Experimental Physics (RFNC–RSRIEP), Sarov, Russia

The applicability of a method of resonance to slowing down structure such as “the chain of bound resonators” (CBR), used in amplifiers and generators of a centimeter wave band is justified. The experimental results obtained on an model of slowing down structure such as CBR surveyed.